核安全三十年

核电厂安全的概念从不是一成不变的

Pierre Tanguy

1986 年切尔诺贝利事故以来，核电厂安全已成为国际核工业界关注的中心。近 30 年来，人们在安全实践的发展方面已有颇多建树，而国际原子能机构(IAEA) 一直在这方面起着重要的作用。

从历史上说，《核反应堆安全工艺学》已对这个领域，特别是事故，提出了一些明确的观点。* 关于对 3 兆瓦试验堆 SL1 1961 年 1 月发生的事故所作一般结论中的一段话，自切尔诺贝利事故发生以来，已多次被人引用：

"大多数事故都涉及设计错误、仪器仪表故障和操纵员或经管人员差错。*SL1* 事故是所有这些错误的客观教训。虽然对于这起事故、它的起因及其教训已有许多讨论，但人们很少注意到这起事故的人为方面原因。存在这样一种倾向，即人们只注意发生了什么事，指出系统的缺陷，但不去了解它们发生的原因，以及当时为什么作出那样一些决定。在事故后的检讨中，应该考虑事故前存在的状况和对工作人员的种种压力……"

Tanguy 先生是设在巴黎的法国电力公司 (EDF) 核安全部的视察长。这篇文章是根据他 1987 年在 IAEA 作的一次口头介绍整理的。

* 马萨诸塞理工学院出版社出版 (1964)，编者为 Thomson 和 Beckerly。

考尔德豪尔，世界第一座大型核电厂，于 1965 年在英国坎布里亚的温斯克尔工厂正式投入商业运行。(来源：UKAEA)

安全特性是核电厂设计中的关键因素。（来源：UKAEA）

这些意见至今仍然是中肯的，并能帮助我们着手去解决当前的安全问题。

本文的基本思想以《核反应堆安全工艺学》的第一页为基础。在这页中，作者对过去几个10年核动力的发展情况作了介绍。

以10年为阶段进行介绍是一种很好的尝试，因为每10年都可用突出特定的安全方面情况加以表征。数目有限的有重大安全意义的事件，可很好标志安全发展这一阶段的结束和新阶段的开始。很明显，发生三里岛事故的1979年和发生切尔诺贝利事故的1986年，都是这样的参考点。IAEA在1957年成立，是另一个里程碑。

核安全的"史前史"

David Okrent在其所著《管理过程历史上的核反应堆安全》一书中，选定了1947年的事件为第一个具有重大安全意义的事件。在《核反应堆安全工艺学》中，这个事件曾被用做关于历史背景那一章的开头：

"反应堆安全保障委员会在其1947年举行的第一次会议上，研究了第一个关于封闭式反应堆的建议。从那以后，为保护公众而设的反应堆安全壳在美国反应堆安全中一直起着重要作用。"

现在，反应堆的安全壳仍是反应堆安全评价中的重要问题之一。

实际上，正如该书指出的那样，反应堆安全的历史开始得还要早些：

"从反应堆技术发展之初，安全问题就一直是一个着重要考虑的问题。1942年12月2日，即人类历史上第一个反应堆即将达到临界时，费米注意到在场的工作人员的精神愈来愈紧张。为了确保操作能够在平静的环境和周密考虑下进行，他命令停止正在进行的实验，大家放下手中的工作去进午餐。正是由于当初在安全方面有这样的领导能力，迄今（1964年）的反应堆运行中才令人惊异地未发生不幸的事。"

也许，我们对许多核电厂中的管理人员缺乏安全教育，因为大部分所谓的异常事件是在为换料或维修停堆之后重新起动的过程中发生的。现在的情况是，人们总是要求尽快使核电厂并入电网，这就使得那些负责人不愿在他们陷入更严重的困难之前，当遇到一些小麻烦时便停止工作。

很巧，1957年发生了温斯克尔事故。这起事故使2000居里的放射性碘释入环境：这是第一次，也是切尔诺贝利事故以前发生的仅有的一次向环境大规模释放放射性。这起事故及其潜在的长期影响，一直是切尔诺贝利事故发生以来重新开始的一些辩论的话题。

WASH-740是第一份对一起严重失控事故的最大影响作出评价的报告。这份报告成为《普赖斯－安德森法》中应该包括的那些责任范围的基础。这个法律文件就美国核电厂保险方面的条款作了规定。

这份报告虽在多年以后，到1966年曾有过一个修改本，但并未被人所熟知。在Rasmussen报告（1975年）和切尔诺贝利事故之前，WASH-740报告是关于一起很严重核事故的后果的主要参考资料。

Okrent认为，在初期的年月中，人们只把安全性的重点放在设计特征上，而对其他阶段（如建造和运行等阶段）的安全性则几乎不怎么关注。1965年，美国原子能委员会（AEC）出版了关于一般设计规范的第一个版本。但在与反应堆安全咨询委员会（ACRS）讨论后于1967年印刷的第二版中，才写入了许多现在依然切题的重要方面。这些规范的发表，是安全决定论方法中的决定性步骤。巧合的是，在同一年，在奥地利维也纳召开的一次国际会议上，第一次引入了概率安全评价（PSA）的思想。这种思想现在已经有了很广泛的发展。

在1957年以前，人们对核安全问题还没有充分认识，即认为它与核动力的发展无关。后来，人们才认识到了它的重要性。所以，这里使用的"史前史"是一个适当的术语。核安全已是一些与核能和平利用开

发工作有关的组织主要关切的问题，但并非是完全自发的。Frangois Cogne 在其题为《核安全的进展》一文中提到，在 1955 年和 1958 年召开的头两次日内瓦会议中，未举行过任何以安全为中心议题的专门会议。* 在这个史前史时期，美国在核动力安全方面取得了三项重大进展。David Okrent 认为，第一项进展是：反应堆安全保障委员会前主席 Edward Teller 于 1953 年就 AEC 的安全基本观点作了第一次正式声明：

"在一般人看来，核反应堆的主要危险在于它有可能发生爆炸。不过应该指出，这样一种爆炸虽然是可能的，但大概只在紧靠核反应堆的范围内有危害，而且其致命影响可能仅限于对操纵员。核电厂含有的放射性毒物，可能给公众带来大得多的危险。在核事故中，这些放射性毒物会被释入大气，或被释入作为水源的水体中。实际上，这些放射性毒物甚至在被带到下风向 *10* 英里距离处以后，仍将保持危险的浓度。即使被带到 *100* 英里距离处，这些放射性毒物也许仍具有某种危险。"

这些话是在切尔诺贝利事故之前 33 年说的。

第二项进展是，建立了用来确定核电厂周围可能要疏散居民的区域（以英里为单位）的半径 R 的经验公式：

$R = 0.01\sqrt{P}$，式中 P 是热功率，以千瓦计。

用这个经验公式可以求得，1000 兆瓦（电）核电厂的疏散半径为 17.3 英里，或约 30 公里。这个经验公式建立于比切尔诺贝利事故早 36 年的 1950 年。

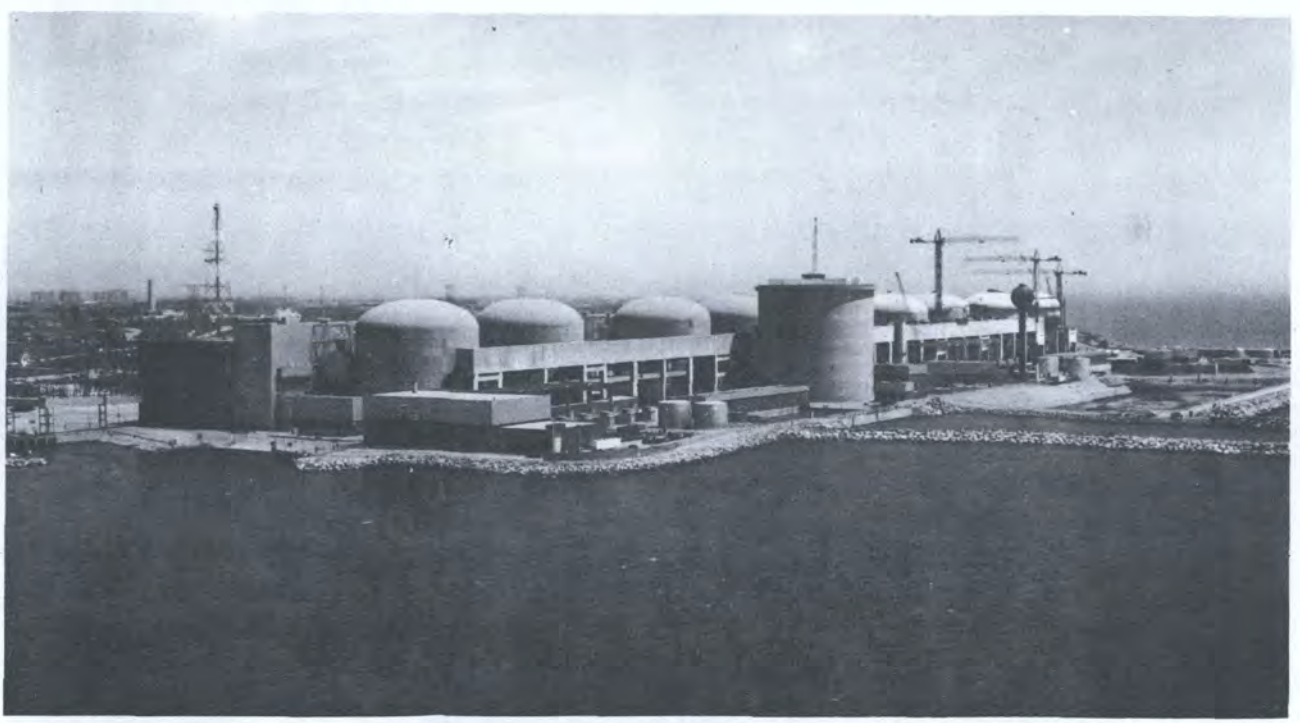
第三项进展是，美国 1953 年宣布在希平港建造第一座民用核电厂。这座核电厂的反应堆建有安全壳。人们注意了保证核电厂以后若干年运行安全的三个主要方面，即事故预防、用安全壳减轻事故的后果和制订应急计划。

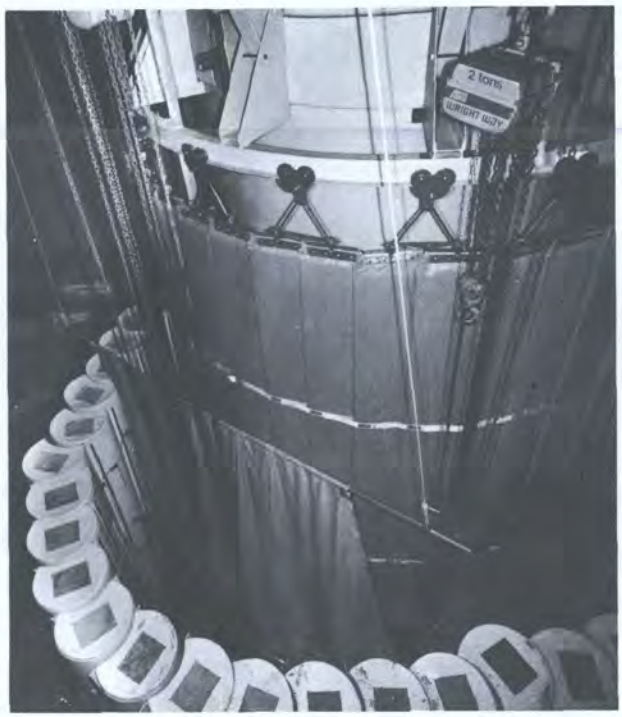
1957 — 1967 年：设计的安全性

这一时期安全方面的主要工作是，人们非常重视设计的安全性。目前仍在应用的大多数概念，都是在这个时期建立的。它们包括了主要的安全功能：链式反应的控制；堆芯的冷却；放射性物质的封隔。在这一时期，人们建立了纵深防御概念，提出了满足单项故障准则所需冗余度要求，并且为安全特性提供设计依据引入了一些假想的始发事件。虽然某些进展是以后取得的，但大多数外部事件如地震和洪水等，在当时就已经引入。

* 法文文章，载于《核综论》，No.1（1984）。

60 年代后期行将建成的皮克灵核电厂。





三里岛事故迫使人们将工作重点放在运行安全上（来源：GPU）

在 AEC 的这种方案中，曾使用过 1959 年第一次介绍的“最大可信事故”概念。这个概念当时未被普遍接受。

在法国，人们曾强调两点，一是放射性材料和环境之间的多层屏障系统，二是对这些屏障可能面临的任务的评价。

这里应该提及一些在这个时期广泛讨论的，以及在今天仍有一定意义的技术问题。人们曾提出过压力容器完整性问题。这个问题的提出，与以预防事故和减轻事故后果（万一发生事故时）为基础的安全方案有关。这种方案对重点放在防止管道破裂的压力管设计是很好的，但尚应论证向其他管道的扩展不会导致不可接受的后果。就压力容器设计来说，提供一个能够经得住压力容器破裂影响的安全壳是必要的吗？对于气冷堆来说，这个问题容易回答。因为，人们认为气冷堆不需要用安全壳来把假想事故的影响保持在可接受的水平。

对于轻水堆（LWR），这个问题就较难回答。当 AEC 认为这样一种失效是“不可思议”的时候，1964 年由英国专家提出的一份报告却得出结论说，在高于名义的脆性－展性转变温度范围的温度下，也就是在突然失效据认为不会发生的运行温度范围内，压力容器迅速失效是可能的。1965 年，美国开始实施一项专门的研究计划。这项计划的实施持续了将近 10 年的时间。橡树岭国家研究所实施的《大型型钢试验计划》的结果表明，在运行温度下，用来制造压力容器的厚壁钢材是很坚韧的，不会发生迅速失效现象。

与此同时，从应力分析到在役检查的法规和标准也有了许多重要的改进。最后，人们认为由可能攻击安全壳的导弹引起的重大破裂的风险是极小的。几年后，Rasmussen 报告确认了这个结论。

另一个技术问题与反应性剧增的风险有关。反应堆动力学已得到广泛的研究和探讨，其中包括对各种反应性系数、氙不稳定性和液态冷却剂情况下的空穴效应的研究和探讨。在这个时期中，曾进行过许多重要的实验，其中包括在爱达荷福尔斯实施的有关轻水堆的著名的 SPERT 计划。

在以后的若干年中，几类反应堆的反应性瞬变，特别是在燃料破损机制方面，仍是美国、日本和法国等国的许多研究设施进行的重大研究的课题。

我们可以认为，在市区为核电厂选址的可能性是在这个时期结束时被排除的。在市区为核电厂选址的问题，最初是美国在 1963 年提出来的。当时，有人申请在雷文斯伍德地区建核电厂：在纽约市昆斯区沿东河建造一座双堆核电厂，每座压水堆为 600 兆瓦（电）。在以核电厂为中心的 5 英里半径内，夜间有 300 万人口，白天有 550 万人口。后来，申请书被撤回。正式的理由与安全问题无关，而是可以从拉布拉多地区得到更廉价的电力。

几年以后，在德意志联邦共和国发生了类似的争论。争论的对象是路德维希港项目。为了对付压力容器失效，人们曾预计要为这个项目作一些专门的规定。最后，虽然工业界极力主张在大城市地区为核电厂选址（例如在美国，爱迪生电力研究所曾于 1967 年写道：“把核电厂厂址选在大城市地区应该是我们今后电力系统设计中的关键因素”），但人们还是大体上取得了如下的一致见解：承认堆芯熔化和安全壳失效之间的关系，放弃在大城市地区为核电厂选址的想法。

1967 — 1979 年：建造的安全性

在从 1967 年起到三里岛事故发生为止的第二个时期中，人们强调的是建造的安全性。这样说或许有些过分，因为当时人们所作的努力大部分仍与设计的

安全性有关。不过，当时引入了一个关键性的安全方面内容：质量保证。

人们通常承认建造阶段安全的重要性。正如1964年出版的《核反应堆安全工艺学》中所指出的：

"既然许多反应堆项目已经遇到了，由加工工艺不当和材料质量低劣引起的困难以及其他许多建造问题，这个阶段（建造阶段）的重要性是怎么估计也不会过分的。反应堆设计的实施如果不能适当地进行，它便会使安全特性无效。在指导的方面，我们没有什么别的可说，只能说保持建造和安装工作的最高标准是至关重要的。"

后来曾给出许多指导，而质量保证也许成了一个与其说是整个管理过程的，倒不如说是许多资料工作的源头。质量保证如今是普遍接受的概念，尽管其实施不时遇到一些困难。

除质量保证外，安全设计也在这些岁月中有了很大发展。指出下面一点是重要的，即一些独立的管理机构在这个时期中，得到了充分发展。在美国，根据《能源改组法》于1974年建立了核管理委员会（NRC）。在这之前，AEC为了补全设计安全规范，于1970年着手实施安全导则（后改名为管理导则）计划。

在法国，于1973年把核安全责任从原子能委员会（CEA）转移到核设施安全服务中心（SCSIN）。在英国，于1975年在保健和安全执行委员会内成立了核设施检查团（NII）。

在这个时期，人们提出了许多设计安全论点。有一个论点涉及液态金属快中子增殖反应堆（LMFBR）的特殊情况。在贝特和泰特事故发生以后，这个时期被假想的堆芯破坏事故（HCDA）所支配。这种假想的事故包括由失去冷却能力和不能紧急停堆（停止链式反应）所引起，由各种能产生巨大影响的现象继之的堆芯熔化。虽然，当时在其他类型反应堆的许可证审批过程中，没有明确地考虑堆芯熔化事件，但在增殖堆许可证审批过程中，却考虑了HCDA，对于这种堆来说，人们普遍认为，负反应性系数和大的热惯性是有利的。当时，在这方面明显地缺乏一致性。但是，在三里岛事故发生以前，在德意志联邦共和国等地对轻水堆堆芯熔化（"中国综合症"）有过许多讨论，做过许多重要的工作。

对于轻水堆来说，LOCA（失水事故）成了主要的问题。1971年在一个中间试验研究设施中得到的结果表明，在某些包括管道破裂的条件下，大量的水将

美国一核电厂进行应急准备评价。（来源：INPO）

离开反应堆压力容器，而堆芯不能立即再淹没。所谓堆芯紧急冷却系统（ECCS）在一个时期中曾是最有争论的问题，反核运动在他们的行动中曾利用过这个问题。这种论点把安全重点放在大管道的所谓剪切破裂上，因而遗憾地使人们不再注意更可能发生的中小管道破裂——尽管Rasmussen报告明确指出，它们都是风险最大的环节。三里岛事故不幸地使人们想起这些实际存在的安全问题。

在这个时期讨论过的其他许多安全问题中，火灾至少在1975年美国发生布朗兹弗里事故之前的十年，就被认为是很重要的潜在安全问题。这起事故使管理部门做了许多工作，于是，引入了许多新的要求。对运行安全有重要意义的其他一些问题，也得到了解决。

最后一点，1975年发表的Rasmussen报告（WASH-1400），也是这个时期的一个重要特征。尽管人们对这份报告的正文摘要，及其在这场公开辩论中的应用有争论，但最重要的是，对安全方面可从概率风险分析方法中得到的好处有了广泛一致的认识。这种分析方法，是设计工作中所用决定论风险分析方法的补充。这是世界一致的看法。Okrent的书中所载ACRS信的一段明确表达了这种一致的认识：

"《反应堆安全研究》在假想事故分类、潜在薄

弱环节鉴定，及对开发相对的和定量的风险评价方法所做工作等方面，对理解轻水堆安全作出了宝贵的贡献。这种方法学应该应用于其他类型反应堆的设计，其他的反应堆堆址条件，和其他事故的始发和后果。”

1979年3月28日，世界核电安全情况总的来说是令人满意的。用来保证核电安全的方法是协调的，没有任何悬而未决的严重问题。与以后说的相反，没有忽视恶性事故。概率风险评价的确曾确认，恶性事故发生的概率是低的。这种评价的结果的确有过这样的肯定，即人们可以指望安全壳有明显减轻事故影响的作用——它能使事故对公众和环境的严重放射学影响大大减轻。事实上，核工业界的某些成员甚至曾经相信，核电厂不仅足够安全，而且是安全得过了头。

也许当时人们忽视了，多年来核电厂已有所发展，发电能力已有增加的事实。当时，衰变热达到了比过去高得多的水平。为了降低发生事故的可能性，增加了许多专设安全措施，但反应堆的设计已变得更加复杂。这时，在各种安全设施可能发生的故障之间，已有了明显的关系。更为重要的是，大多数的讨论只涉及设计，而对运行安全及人的因素影响没有给予足够的注意。

1979—1986年：运行中的安全

第三个时期是大家熟悉的时期。这个时期包括从三里岛事故吸取的许多教训。在大多数国家中，这些教训在切尔诺贝利事故之后重新得到了强调。运行安全只是在三里岛事故以后，才得到了应有的注意。许多重要的安全措施都在三里岛事故中起过作用。它们包括：合理的运行程序的重要性；对运行人员需要进行适当培训；人－机衔接必不可少的改进；运行经验反馈的有效性；需要有效的应急计划；和在运行组织各个层次上“决断”失误的危险。目前，这些安全措施在大多数国家里都得到了应有的注意。美国核电运行研究院（INPO）的建立，是一个明显的标志。

此外，在这个时期，概率论方法学终于在改善安全的实践中得到应用。在安全设计中很有用的故障准则是一个典型事例，不过它还不够充分。如果产生的影响太大——所谓“峭壁”影响，那么就存在这样一些场合，面对它们的人们必须考虑各个冗余安全系统都发生故障的情况。在这些场合，唯一的决策手段是概率安全评价（PSA）。借助于PSA，已经解决了供电完全中断（核电厂的内部电源及外部电源都发生故障）和在预期瞬变下不能紧急停堆（ATWS）等复杂的安全问题。

在决策过程中，应该使用“安全目标”，即使是含蓄的也好。回顾起来，似乎从核电工业一开始就有了一种自觉的、力求使核动力堆比其它工业企业或技术企业更安全的政策。许多国家已在试图用有限的几个与有害事故发生有关的概率值，来说明这个一般的目标。这是不易实现的想法，即使许多国家一致同意了某些安全目标的概率值数量级，有关它们的应用或实际实施的讨论也是困难的。

最后，核电厂安全性在这一时期无疑有许多明显的改善。切尔诺贝利事故虽然不一定妨碍我们这样说，但这一事故迫使我们不得不对核电安全的基本观点和实践，作一次新的全面审议。

1986年及以后：国际安全

谁都不会知道，核技术这个领域在下个十年中的主要安全趋势是什么。固有安全等时髦概念不会有很光明的前途；不过，核安全的国际合作将是引人注目的。

在1986年以前，世界各国已开始进行广泛的国际核安全合作。除IAEA的作用外，还有许多富有成效的国际核安全合作的实例。这些合作，是通过经济合作和发展组织的核能机构（NEA／OECD）等国际组织，以及通过双边或多边协定进行的。

核安全的合作包括一切方面，从管理业务到包括安全研究在内的运行经验的交流，都有这种富有成效的合作实例。过去所取得的那些安全进展中，有许多是共同研究计划的成果。这种计划太多，此处不能一一列出。

IAEA的核安全计划。IAEA《规约》的起草者赋予机构“设法加速原子能对世界和平、健康和繁荣的贡献”的任务。在早期的日子里，起草者就赋予机构促进核能的任务，曾广泛研究过措辞。但同时他们还在核安全领域赋予机构一种特殊的使命。

机构没有任何实际的管理权力；它只被授权提供咨询服务。唯一的例外是在技术援助项目的场合。在这种场合，机构除了遵守国家的管理当局或安全当局颁布的安全标准外，还要遵守它自己的安全标准，如果它们并不相互抵触的话。

机构建立之时，世界上只有很少几座核电厂，能够用于其核安全计划的资源有限。一些国家的管理部门率先制订各种标准。这些标准反映了有关部门各自卷入核电事业的程度。机构当时密切注视的是那些明显地需要达成国际协定的领域中的工作。

例如，在60年代，人们制订了有关放射性物质通过国际边界运输的著名“条例”。这些“条例”广泛地被用作为国家立法的基础，并为许多有管理权力的部门所接受。机构曾与莱茵河航行中央委员会、国际铁路运输总办事处、欧洲原子能共同体、国际海事组织、国际空运协会、万国邮政联盟、世界卫生组织等组织密切合作，来制订这些“条例”。

70年代，核电厂的项目增加。人们认识到，对运输以及其他核安全领域来说，协调不同国家标准和管理要求，将有益于核电厂设备和服务方面的国际贸易的发展。所以，机构开始实施一项计划，以制订一整套核电厂安全标准。最后，这项计划导致了机构的核安全标准（NUSS）计划中的60份文件的出版。这些文件涉及核电厂的选址、设计、建造、运行和质量保证。

三里岛事故和世界能源状况的变化，导致了新核电厂订货数目下降。机构为了更加强调运行安全，重新确定了它的许多计划的方向。1982年，它修订了它的《基本安全标准》，以考虑国际放射防护委员会（ICRP）关于剂量最优化的建议。在这个时期，为满足职业人员和公众的需要，它出版了范围很宽的技术导则文件，这些文件涉及辐射防护领域以及应急计划和准备。

从一开始，机构就向成员国派遣专门的专家小组。这些小组大多与依照机构技术援助计划提供的服务和援助有关。通过这些专家小组，成员国尤其是发展中成员国将从专家建议中获益。1972年，机构为了满足成员国日益增加的需要，宣布可派遣一些专家小组，帮助成员国对研究堆进行全面安全评价（INSARP）工作——这种堆有许多在发展中国家。

1983年，机构正式派出第一个运行安全检查组（OSART）。出访的OSART专家小组向核电厂运行者提出了有益的建议，并在现场工作一级交流了改进安全的意见。切尔诺贝利事故发生以来，OSART计划已大为扩展；机构现在至少每月派出一个专家小组。

同样在1983年，机构建立了一个国际性的事故报告系统（IRS），以保证所有参加国中的运行者从“学得的经验”中获益。这个系统，使NEA／OECD经营的那个系统得到了补充。具体地说，IRS系统包括了OECD范围以外国家中的核电厂。目前，这个系统正在扩大，以便包括更多的“有意义事件”，和使人们能够对各种事件进行有效及时的分析。机构现已建议向成员国派遣重大安全事件评价（ASSET）专家小组，以便以核电厂的安全性为着眼点，在现场对核电厂的运行经验进行深入的分析。这种分析工作的重点是人－机衔接和人的因素。

1985年，机构建立了国际核安全咨询组（INSAG），以评议机构在核安全领域的活动，并就机构的未来工作提出建议。INSAG曾对事故后讨论会上介绍的资料和分析积极进行了评议。这次讨论会是为响应切尔诺贝利事故，于1986年在维也纳召开的。

机构还向成员国派遣辐射防护咨询组（RAPAT）专家小组，以便帮助无核电国家建立它们的辐射防护能力；这一领域的培训工作正在扩大。

今日的重点在哪里？

今日核安全工作的重点，正在从建立标准和质量保证，通过改善运行安全和减轻事故后果，转向事故的预防。减轻事故后果的途径有三个方面，即事故管理、安全壳的完整性和应急准备。

此外，监测网的建立，干预水平的确定（在国家一级的范围内证明，这样的干预水平能够有效保护公众免受恶性事故的影响），将必须包括在多国的和多机构的努力中。

最后应该说，从核电事业之始，安全工作的重点就一直放在预防事故上，特别是恶性事故。面对万一发生的事故，我们不但要有思想准备，还应该相信，如果我们考虑到从30多年的核安全发展中取得的那些经验教训，这些事故是可以避免的。